

Modelado y resolución del problema del encapsulamiento de combustible nuclear gastado

Joaquín Bautista, Luis Batet, Manuel Mateo

Recibido: 10 de Diciembre de 2019

Aceptado: 12 de Febrero de 2020

<https://doi.org/10.37610/dyo.v0i71.578>

Resumen

En la gestión de residuos de combustible de las centrales nucleares españolas, está previsto activar los almacenes temporales individualizados (ATI) cuando se alcanza la saturación de la piscina destinada a albergar elementos de combustible nuclear gastado durante el periodo de explotación de la instalación; al finalizar dicho periodo, un ATI puede utilizarse como almacén transitorio a corto o largo plazo hasta que el almacén temporal central (ATC) esté disponible. Los elementos combustibles (EC), gastados y ubicados en la piscina de la central nuclear (CN), se seleccionan para su almacenado en seco en contenedores (cápsulas) atendiendo a una serie de restricciones impuestas a cada ATI por el órgano regulador competente en función de los requerimientos que afectan específicamente a los contenedores utilizados (v.gr. la limitación de la carga térmica o el número de posiciones para elementos combustibles). Las características de estas cápsulas condicionan el tiempo mínimo de enfriamiento del combustible en la piscina de la central nuclear y, por consiguiente, el tiempo necesario para completar el vaciado completo de dicha piscina. En este contexto, presentamos el problema del encapsulamiento en una etapa del combustible nuclear gastado, ofreciendo una formulación y un método de resolución en dos fases. En la primera fase, se utiliza un modelo de Programación lineal entera mixta (MILP-1), cuyo objetivo es minimizar el coste de los contenedores (de diverso tipo) que se requieren para reubicar los elementos disponibles en la piscina de una central nuclear. Para la segunda fase se ha implementado un algoritmo exacto (Algoritmo A1) que, partiendo de una solución de MILP-1, determina asignaciones óptimas de elementos a contenedores regionalizados por limitaciones sobre la carga térmica permitida en cada región. El procedimiento conjunto (MILP-1 más A1) es capaz de resolver óptimamente instancias con 1500 elementos combustibles, 6 tipos de regiones térmicas y 4 tipos de contenedores en tiempos de CPU inferiores a 0.75 segundos, repartidos así: 0.5 segundos para MILP-1 más 0.25 segundos para A1.

Palabras clave

Programación lineal entera mixta (PLEM); Central nuclear (CN); Elemento combustible nuclear; Gestión de residuos nucleares; Calor de decaimiento; Cápsula multipropósito MPC-32; CN Ascó; Almacén Temporal Individualizado (ATI)

1. Preliminares

Los sectores energéticos son fundamentales para la actual actividad humana. La Energía, bajo la óptica de los sistemas productivos, pasa por diversos procesos de generación, transporte y distribución y consumo final

La generación de energía eléctrica se basa en la transformación de otras clases de energía (v.gr. cinética, térmica,

química, lumínica, solar, eólica, mareomotriz, nuclear, etc.). Cuando dicha generación se realiza con fines industriales, los procesos de transformación se llevan a cabo en instalaciones denominadas centrales eléctricas.

En todas las fases del tratamiento energético aparecen numerosos problemas de optimización, algunos de ellos combinatorios, y de simulación, tanto bajo la óptica tecnológica como la de la gestión de operaciones. Así, en la literatura especializada, podemos encontrar trabajos en el marco de la ingeniería nuclear sobre modelos de simulación del comportamiento de un fluido (temperatura y presión) dentro de un contenedor de combustible nuclear gastado [1]-[2], también encontramos trabajos relacionados con el modelado clásico y resolución de problemas de planificación estática de la distribución de la energía eléctrica [3]-[5], así como otros trabajos, también de planificación, que proponen flexibilizar la distribución de energía en la red eléctrica atendiendo a la emergente variabilidad de la demanda [6].

Las centrales nucleares son sin duda centrales eléctricas que ofrecen un alto rendimiento en el proceso de transfor-



Joaquín Bautista
joaquin.bautista@upc.edu
ORCID: 0000-0002-2214-4991

Luis Batet *
lluis.batet@upc.edu
ORCID: 0000-0003-1882-6313

Manuel Mateo *
manel.mateo@upc.edu
ORCID: 0000-0002-3975-9116

* Universitat Politècnica de Catalunya. Avda. Diagonal 647,
08028 Barcelona, España.

mación de energía. No obstante, el combustible empleado en ellas, debido a su elevada carga radiológica, requiere una serie de controles de carácter tecnológico que están sujetos a una estricta reglamentación a lo largo de todo su ciclo de vida [7]. Dicho ciclo se inicia con la extracción del mineral de uranio, pasa por la fabricación de pastillas de uranio enriquecido para elementos combustibles, y culmina con la gestión de los residuos radiactivos generados por las centrales nucleares.

En las centrales nucleares, los elementos combustibles nuevos se introducen por carga o recarga en el reactor nuclear donde se “quemán” por reacción de fisión en cadena, emitiendo energía calorífica y dando lugar a productos de fisión que constituyen el combustible nuclear gastado.

Los elementos combustibles una vez gastados son extraídos del reactor nuclear y se almacenan temporalmente en una piscina donde permanecen 5 años como mínimo (por requisitos tecnológicos que no legales) hasta completar su proceso de “enfriamiento” para reducir su actividad. En esta primera fase de almacenamiento del combustible en bastidores independientes (racks), dentro de la piscina, aparecen problemas de optimización de la fiabilidad del diseño de bastidores y disposición de elementos ante posibles desplazamientos de los mismos [8]. Además, como la capacidad de la piscina está limitada a un número concreto de elementos, surgen otros problemas de gestión del almacenamiento del combustible nuclear gastado vinculados a dicha limitación [9].

Después de al menos 5 años, los elementos combustibles gastados y enfriados pueden extraerse de la piscina, en una o varias etapas, y ser relocalizados en cápsulas o contenedores que presentan mayor o menor rendimiento en la transferencia de calor del combustible en función de la tecnología incorporada a la cápsula, que puede ser más o menos compleja [10]. Generalmente, tales cápsulas están diseñadas específicamente para el almacenamiento en seco (v.gr. cápsulas MPC: Multi Purpose Canister para 32 o más elementos combustibles).

Una vez encapsulado el combustible gastado, el almacenamiento de las cápsulas puede hacerse transitoriamente en un almacén temporal individualizado (ATI), localizado den-

tro del propio emplazamiento de la central nuclear, hasta que se efectúa su traslado definitivo ya sea para ser reprocesado o para ser alojado en un almacén temporal centralizado (ATC) o en un almacén geológico profundo (AGP).

En este marco conceptual, proponemos un procedimiento exacto compuesto de dos fases para minimizar el coste de almacenamiento en seco del máximo número de elementos combustibles enfriados en la piscina, empleando el mínimo número de cápsulas MPC-32 [11]-[12], teniendo en cuenta el contenido de la piscina de la central en una fecha preestablecida para su vaciado completo en una sola etapa. La aplicación del procedimiento se ilustra mediante la instancia ASCÓ#01_6.0 cuyos datos están inspirados en la central nuclear Ascó.

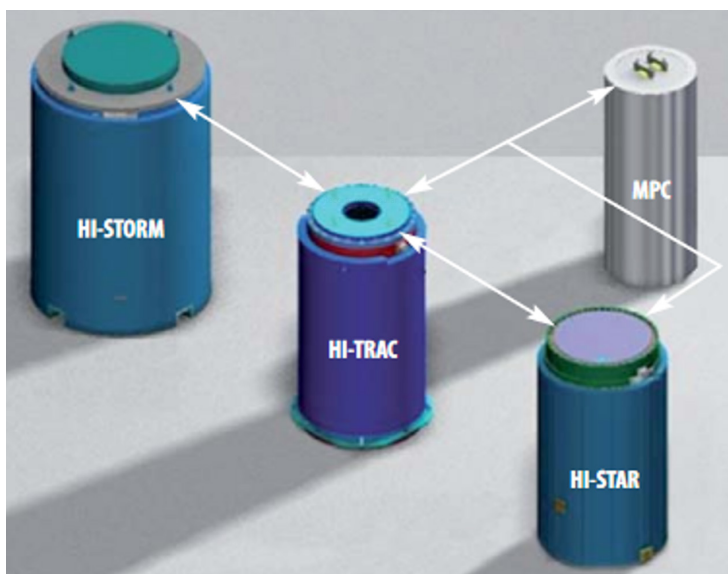
El resto de este trabajo se estructura de la siguiente forma. En la sección 2 describimos algunos sistemas de almacenamiento en seco del combustible nuclear gastado. La sección 3 está dedicada a la descripción, modelado y resolución del problema del encapsulamiento de combustible nuclear gastado. En la sección 4 ilustramos el procedimiento propuesto mediante un caso de estudio inspirado en una central nuclear real. Finalmente, dedicamos la sección 5 a las conclusiones derivadas de este trabajo y a una breve descripción sobre líneas de trabajo futuras.

2. Sistemas de almacenamiento en seco

En España la responsabilidad del desmantelamiento completo de las instalaciones nucleares recae en ENRESA, empresa que es también responsable de la gestión definitiva de los residuos nucleares y radiactivos, siendo una actividad relevante dentro de esta gestión la del almacenamiento temporal en seco del combustible nuclear gastado.

Se puede afirmar que no existe una única solución para tal actividad, aunque en general se ha optado por encapsular los elementos combustibles gastados usando contenedores con diversas funciones y características. Por ejemplo, el sistema de almacenamiento y transporte de combustible gastado en Ascó está formado por distintos componentes para encapsular, transportar, transferir y blindar el combustible nuclear gastado (ver Figura 1).

Figura 1 Componentes del sistema HI-STORM para almacenar y transportar combustible nuclear gastado. El contenedor HI-TRAC permite transferir la cápsula MPC al HI-STORM (fuentes: CSN y NRC)

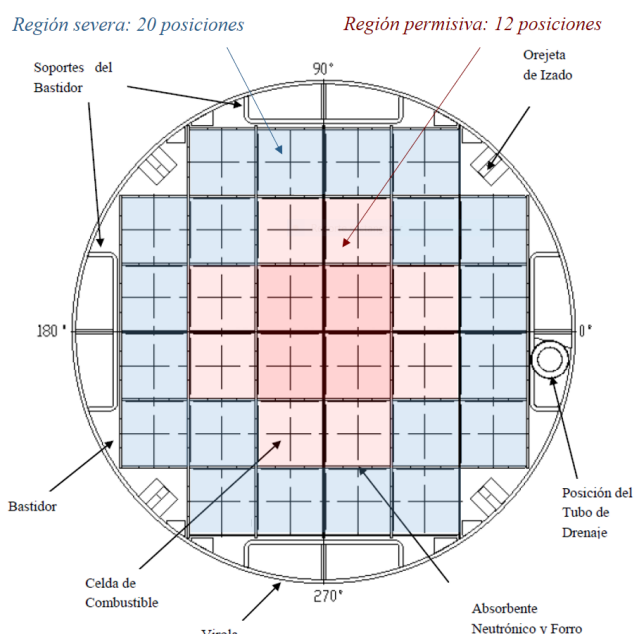


Una solución posible para el almacenamiento es la propuesta HI-STORM que requiere los siguientes componentes: (i) la cápsula multipropósito (MPC-32), (ii) el módulo de almacenamiento (HI-STORM), (iii) el contenedor de transporte (HI-STAR) y (iv) el contenedor de transferencia (HI-TRAC), siendo la función de este último la de transferir los contenidos entre los distintos continentes del sistema de almacenamiento [13].

Atendiendo a la solución de Ascó, para garantizar la integridad del combustible debe limitarse la temperatura a la que pueden verse sometidas las varillas metálicas que envuelven el UO₂. Ello, a su vez, impone restricciones en cuanto a la potencia térmica (calor) que pueden generar los elementos combustibles en el interior de la cápsula.

En efecto, en condiciones de carga uniforme cada una de las posiciones de la MPC-32 (ver Figura 2) puede albergar un elemento combustible con una potencia máxima de 0.9375 kW en el momento de la carga; por tanto, la potencia térmica total disipada por la cápsula será como máximo de 30 kW). El sistema permite cargas regionalizadas, de manera que pueden ubicarse en la región central de la cápsula (región permisiva, formada por 12 posiciones) elementos combustibles con una potencia residual mayor, a costa de limitar la potencia máxima por posición en la región periférica (región severa, formada por 20 posiciones) y de limitar también la potencia térmica máxima a un valor inferior o igual a 30 kW. La Figura 2 representa las posiciones asignadas a cada región en una cápsula MPC-32.

Figura 2 Sección transversal de una cápsula multipropósito MPC-32 regionalizada. Las regiones permisiva y severa tienen respectivamente 12 y 20 posiciones para albergar elementos combustibles (fuentes: CSN y NRC)



3. Problema del encapsulamiento de combustible nuclear gastado

En esta sección trataremos los puntos siguientes: (i) la descripción y formalización del problema que hemos denominado problema del encapsulamiento de combustible nuclear gastado, (ii) la formulación de un modelo matemático basado en la Programación lineal entera mixta (PLEM) para asignar el máximo número de elementos combustibles a regiones caloríficas minimizando el coste de las cápsulas requeridas (Fase 1 del método de resolución) y (iii) la propuesta de un procedimiento de localización concreta de los elementos combustibles en las regiones de un conjunto de contenedores de diverso tipo (Fase 2 del método de resolución).

3.1. Describiendo el problema

En un determinado instante T del horizonte temporal, que corresponde en nuestro caso a la fecha prevista para vaciar en una etapa la piscina de combustible de la central nuclear, se dispone de n elementos de combustible nuclear gastado agrupados en un conjunto I ($i=1, \dots, n$ ($n \equiv |I|$)).

Todo elemento combustible $i \in I$ se caracteriza por su potencia térmica o calor residual o de decaimiento [14]-[15] en el instante de extracción T , sea $q_i(T)$. Tal valor depende del calor residual inicial en el instante de inmersión del elemento $i \in I$ en la piscina y del tiempo que este ha permanecido en ella hasta la fecha prevista para el vaciado de la misma.

Por otra parte, se dispone de un sistema de almacenamiento compuesto por un almacén temporal individualizado (ATI) y por un conjunto K ($k=0, 1, \dots, l$ ($|K| \equiv l+1$)) de tipos de contenedores de combustible nuclear gastado; donde $k=0$ simboliza al tipo de contenedor universal capaz de albergar sin restricciones a cualquier elemento combustible, eso sí, a un elevado coste arbitrario $\gamma_0 \rightarrow \infty$.

A cada tipo de contenedor ($k \in K$) se asocia un coeficiente de adversidad γ_k , cumpliéndose $\gamma_k \ll \gamma_0$ ($\forall k \neq 0$), el cual corresponde al coste arbitrario por seleccionar un contenedor del tipo $k \in K$ para albergar al menos un elemento de combustible nuclear gastado. También supondremos que para el tipo de contenedor $k \in K$ se dispone como máximo de un número de unidades igual a $d_k(\forall k)$, siendo la disponibilidad total de contenedores igual a $D = \sum_{k \in K} d_k$.

Los contenedores están regionalizados, es decir, un contenedor está compartimentado en regiones con atributos de capacidad y calor residual. Así, es posible establecer el conjunto de tipos de región de contenedor J ($j=0, 1, \dots, m$

($|J| \equiv m+1$)) en función de una limitación máxima de calor residual y su capacidad para albergar elementos combustibles; donde $j=0$ simboliza al tipo de región universal capaz de albergar sin restricciones a cualquier elemento combustible.

Cada tipo de región ($j \in J$) se caracteriza por sus límites inferior y superior sobre el calor residual $[q_j^-, q_j^+]$ y por su capacidad de almacenamiento h_j medida en número de elementos combustibles que como máximo puede albergar un contenedor en dicha región.

La relación entre un tipo de región ($j \in J$) y un tipo de contenedor ($k \in K$) aquí se establece mediante la matriz B , cuyos coeficientes, $b_{j,k}$ ($\forall j \forall k$), adoptan el valor 1 cuando la región de tipo $j \in J$ está asociada al contenedor de tipo $k \in K$, y valen 0 en caso contrario. Por su parte, la relación entre el elemento combustible $i \in I$ y el tipo de región $j \in J$ se establece a través de la matriz $A(T)$, cuyos coeficientes, $a_{i,j}(T)$ ($\forall i \forall j$), valen 1 cuando el elemento de combustible $i \in I$ puede ser ubicado en la región $j \in J$ en el instante T , y valen 0 en cualquier otro caso; i.e. $a_{i,j}(T) = 1 \Leftrightarrow q_i(T) \in [q_j^-, q_j^+]$. Obviamente, la relación entre el elemento combustible $i \in I$ y el tipo de contenedor $k \in K$, queda establecida mediante la matriz $C(T)$ resultante del producto booleano de las matrices $A(T)$ y B ; esto es, $C(T) = A(T) \otimes B$, cumpliéndose, por tanto, la siguiente propiedad: $(a_{i,j}(T) = 1 \wedge b_{j,k} = 1) \Rightarrow c_{i,k}(T) = 1$.

En tales condiciones, *el problema del encapsulamiento de combustible nuclear gastado* (SNFEP: Spent Nuclear Fuel Encapsulation Problem) consiste en transferir el máximo número de los elementos combustibles, ubicados en la piscina de una central nuclear en una fecha T , hacia un conjunto de contenedores regionalizados de diverso tipo, respetando todas las restricciones tecnológicas de capacidad y calor residual y minimizando los costes operativos o, alternativamente, la adversidad global que supone dicha operación.

3.2. Resolviendo el problema

Tal como se indicó más arriba, nuestra propuesta resuelve el problema en dos fases. La primera fase emplea la PLEM para asignar con mínimo coste los elementos combustibles a regiones térmicas [16], mientras que para la segunda se ha diseñado una familia de algoritmos exactos para ubicar los elementos en las regiones de los contenedores.

3.2.1. Fase 1: Modelo PLEM para minimizar el coste de encapsulamiento

Para formalizar los métodos de resolución propuestos en este trabajo utilizaremos la siguiente nomenclatura.

Parámetros:

T	Instante o fecha prevista para el vaciado de la piscina de la central nuclear en una sola etapa.
I	Conjunto de elementos combustibles. Sean los elementos: $i=1, \dots, n$ ($n \equiv I $). Corresponde a los elementos de combustible nuclear gastado, los cuales se hallan en la piscina de la central nuclear en el instante T .
J	Conjunto de tipos de región de contenedor según limitación máxima de calor residual. Sean las regiones: $j=0, 1, \dots, m$ con $ J \equiv m+1$. Supondremos que existe una región universal, $j=0$, que no presenta limitación máxima de calor residual para los elementos combustibles; a efectos prácticos, los elementos asignados a la región universal permanecerán en la piscina.
K	Conjunto de tipos de contenedores de combustible nuclear gastado: $k=0, 1, \dots, l$ con $ K \equiv l+1$. Supondremos que existe un tipo de contenedor universal, $k=0$, que está asociado a la región universal $j=0$, sin presentar limitación máxima de calor residual para los elementos combustibles; a efectos prácticos, los elementos asignados al contenedor universal permanecerán en la piscina. Los contenedores considerados corresponden a cápsulas multipropósito que pueden albergar hasta 32 elementos de combustible como máximo (MPC-32).
$q_i(T)$	Calor residual o de decaimiento del elemento de combustible $i \in I$ en el instante de extracción de la piscina T .
q_j^+	Límite superior del calor residual en la región del tipo $j \in J$.
q_j^-	Límite inferior del calor residual en la región del tipo $j \in J$. Aquí, supondremos $q_j^- = 0 \forall j \in J$.
$A(T), a_{ij}(T)$	Matriz de compatibilidad elemento-región, cuyos coeficientes tecnológicos a_{ij} adoptan el valor 1 si el elemento de combustible $i \in I$ puede ser ubicado en una región del tipo $j \in J$ en el instante T , y valen 0 en cualquier otro caso. Formalmente: $a_{i,j} \equiv a_{i,j}(T) = \begin{cases} 0, & \text{if } q_i(T) > q_j^+ \\ 1, & \text{en caso contrario} \end{cases}$
$B, b_{j,k}$	Matriz de compatibilidad región-contenedor, cuyos coeficientes tecnológicos $b_{j,k}$ valen 1 cuando la región tipo $j \in J$ está asociada al contenedor tipo $k \in K$, y valen 0 en caso contrario.
$C(T), c_{i,k}(T)$	Matriz de compatibilidad elemento-contenedor, definida como $C(T) = A(T) \otimes B$, cuyos coeficientes tecnológicos $c_{i,k}(T)$ adoptan el valor 1 cuando el elemento $i \in I$ puede ser ubicado en un contenedor del tipo $k \in K$ en el instante T , y valen 0 en caso contrario. Por tanto, se cumple: $c_{i,k} \equiv c_{i,k}(T) = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{j \in J} a_{i,j}(T) \otimes b_{j,k} = 1 \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$
h_j	Capacidad de almacenamiento de una región del tipo $j \in J$ medida en número de elementos combustibles por contenedor que como máximo pueden localizarse en dicha región.
H_k	Capacidad máxima de almacenamiento de un contenedor del tipo $k \in K$ medida en número de elementos combustibles. Se cumple la relación: $H_k = \sum_{j \in J} b_{j,k} \times h_j$
d_k, D	Número de unidades disponibles de contenedores del tipo $k \in K$ en el instante previsto para el vaciado de la piscina (T). La disponibilidad total de contenedores prevista para dicho instante es: $D = \sum_{k \in K} d_k$.
γ_k	Coefficiente de adversidad de un contenedor del tipo $k \in K$. El valor γ_k simboliza el coste arbitrario por seleccionar un contenedor del tipo $k \in K$ para albergar elementos de combustible gastado.
Variables:	
x_{ij}	Variable binaria que adopta el valor 1 si el elemento de combustible $i \in I$ se asigna a una región del tipo $j \in J$, y vale 0 en caso contrario.
y_j	Número de elementos de combustible encapsulados en regiones del tipo $j \in J$.
z_k	Número de contenedores del tipo $k \in K$.
$\Gamma(T)$	Función de adversidad global. Representa el coste global de los contenedores usados para albergar el combustible nuclear gastado en la fecha prevista, T , tras el vaciado de la piscina de la central nuclear.

Haciendo uso de esta nomenclatura, formulamos el siguiente modelo matemático.

MILP-1: Modelo para la asignación de elementos combustibles a tipos de regiones

$$\min \Gamma(T) = \sum_{k=0}^l \gamma_k z_k \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m x_{i,j} = n \quad (2)$$

$$\sum_{j=0}^m a_{i,j} x_{i,j} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$y_j = \sum_{i=1}^n a_{i,j} x_{i,j} \quad \forall j = 0, 1, \dots, m \quad (4)$$

$$z_k \geq \frac{b_{j,k}}{h_j} y_j \quad \forall j = 0, 1, \dots, m; \forall k = 0, 1, \dots, l \quad (5)$$

$$z_k \leq d_k \quad \forall k = 0, 1, \dots, l \quad (6)$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 0, 1, \dots, m \quad (7)$$

$$y_j \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\} \quad \forall j = 0, 1, \dots, m \quad (8)$$

$$z_k \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\} \quad \forall k = 0, 1, \dots, l \quad (9)$$

En el modelo MILP-1, la función objetivo (1) representa la minimización de la función de coste de encapsulamiento o adversidad global, cuyo valor coincide con el número total de contenedores cuando se extraen todos los elementos combustibles de la piscina ($z_0=0$) y los coeficiente de adversidad son unitarios para todos los tipos de contenedor ($\gamma_k=1 \forall k=1, \dots, l$). Las igualdades (2) y (3) garantizan la asignación de todos los elementos combustibles a alguna región, incluida la región universal $j=0$. Las igualdades (4) sirven para determinar el número de elementos combustibles que deben ser encapsulados en cada tipo de región $j \in J$. Las restricciones (5) sirven para acotar inferiormente el número de contenedores de cada tipo $k \in K$, mientras que las restricciones (6) se emplean para acotar superiormente tal número en función de la disponibilidad de contenedores. La condición (7) impone que las variables de decisión ($x_{i,j}$) sean binarias, y finalmente, las condiciones (8) y (9) fuerzan respectivamente la no negatividad e integridad de las variables auxiliares y_j y z_k .

La ejecución del modelo MILP-1 ofrece tres tipos de resultados: (i) una asignación óptima de los elementos combus-

tibles a las diversas regiones de contenedor ($x_{i,j}^* \in \{0,1\} \forall i \forall j$), respetando los límites máximos de calor residual permitidos en ellas, (ii) el número óptimo de elementos combustibles que debe albergar cada región ($y_j^* \forall j$), y (iii) el número óptimo de contenedores de cada tipo ($z_k^* \forall k$) que corresponde al mínimo coste de encapsulamiento.

Aunque los resultados anteriores son interesantes, queda pendiente concretar la localización de los elementos combustibles en las regiones reales de los contenedores.

3.2.2. Fase 2: Asignación de los elementos combustibles a las regiones de los contenedores

Obviamente, existen muchas soluciones para este problema, tantas más cuanto mayores sean los valores de la terna (n, m, l).

En efecto, si el procedimiento diseñado consiste en asignar, de uno en uno, los elementos combustibles a las regiones concretas dentro de los contenedores, toda ordenación de los objetos correspondientes a las terna de conjuntos (I, J, K), puede dar lugar a una solución distinta. Por ejemplo, si la ordenación recae sobre el conjunto I de elementos combustibles, entonces, el número de formas distintas de asignar es $n!$, lo cual puede dar lugar a un astronómico número de soluciones potencialmente distintas con instancias de dimensiones realistas, siendo todas ellas igualmente válidas desde el punto de vista de la optimización de la función $\Gamma(T)$.

Atendiendo a esta idea, proponemos una familia de algoritmos constructivos, $A1[\pi(n)]$, que es función de la secuencia $\pi(n)$ reguladora de la asignación de los elementos combustibles a las regiones de los contenedores.

En efecto, partiendo de una solución óptima ofrecida por MILP-1 ($x_{i,j}^* \forall i \forall j, y_j^* \forall j, z_k^* \forall k$), el procedimiento $A1[\pi(n)]$ crea una secuencia $\pi(n)$ de elementos combustibles (sentencia 5 en $A1[\pi(n)]$) que sirve para establecer el orden de asignación de estos a los contenedores. Una vez determinado el tipo de contenedor k_i^* que corresponde al elemento en curso π_i , se registra el elemento en la matriz $MPC32[\cdot]$ (sentencia 13 en $A1[\pi(n)]$), cuyas filas corresponden a contenedores y sus columnas a posiciones dentro del contenedor. Posteriormente, se determinan las cargas de calor residual $Q_{mpc32}[\cdot]$ presentes en los contenedores (sentencia 16 en $A1[\pi(n)]$) y se ordenan los elementos en los contenedores según dichas cargas (sentencia 17 en $A1[\pi(n)]$). Finalmente, se muestran los resultados del algoritmo (sentencia 18 en $A1[\pi(n)]$).

A1[$\pi(n)$]: Familia de Algoritmos

A1[$\pi(n)$]. Procedimiento para asignar elementos combustibles ($i \in I$) en el conjunto de contenedores (cápsulas MPC-32). Dada una secuencia $\pi(n)$, el algoritmo retorna una solución constituida por el vector de cargas de calor residual ($Q_{mpc32}[\bullet]$) presentes en cada contenedor, así como la localización de los elementos combustibles en los contenedores, la cual queda representada por la matriz MPC32[\bullet].

A1[$\pi(n)$]: Algoritmos para asignar elementos combustibles a regiones en función de $\pi(n)$

```

1:      // Inicialización
2:      entrar  $I, (n, m, l), B[b_{i,j}], (q_i \forall i), (x_{ij}^* \forall i \forall j), (y_j^* \forall j), (z_k^* \forall k), P^*$ 
3:      Inicializar  $t=0, MPC32[z_k^*, 32]=\{\emptyset\}$ 
4:      // Crear secuencia de elementos combustibles que define el recorrido de asignación
5:       $\pi(n) = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) \leftarrow \text{Genera\_secuencia}(I, n, P^*)$ 
6:      mientras ( $t \leq n$ ) hacer
7:          fijar  $t=t+1$ 
8:          // Buscar tipo de región global asignada al elemento  $\pi_t$ . Sea  $j_t^*$ 
9:          fijar  $j_t^* = \text{argmax}_{j_j} (x_{\pi_t, j}^*)$ 
10:         // Buscar tipo de contenedor asociado a región global  $j_t^*$ . Sea  $k_t^*$ 
11:         fijar  $k_t^* = \text{argmax}_{k_k} (b_{j_t^*, k}^*)$ 
12:         // Registrar elemento combustible en matriz de cápsulas MPC32
13:         MPC32[ $\bullet$ ]  $\leftarrow$  Registra_elemento( $I, \pi_t, j_t^*, k_t^*$ )
14:     fin mientras
15:     // Calcular cargas de calor residual y ordenar elementos combustibles en contenedores
16:      $Q_{mpc32}[\bullet] \leftarrow \text{Calcula\_cargas}(I, q_i, MPC32[\bullet])$ 
17:     MPC32[ $\bullet$ ]  $\leftarrow$  Ordena_elementos( $I, Q_{mpc32}[\bullet], MPC32[\bullet]$ )
18:     mostrar  $Q_{mpc32}[\bullet], MPC32[\bullet]$ 
19:     // Fin Algoritmo A1[ $\pi(n)$ ]

```

Nótese que A1[$\pi(n)$] puede generar multitud de soluciones gracias a que el punto de partida es una permutación $\pi(n)$ de los elementos combustibles del conjunto I (frase 5 en A1[$\pi(n)$]). Tales permutaciones se pueden crear utilizando una familia de reglas P^* aplicada sobre el conjunto I que inicialmente está ordenado según el código del elemento. Las reglas P^* pueden ser de diversa naturaleza, pudiendo consistir tanto en la simple ordenación de los elementos según sus calores residuales como en reglas más complejas utilizadas para la generación de vecindarios (intercambio e inserción) en algoritmos basados en trayectorias a través del espacio de búsqueda [17].

Obviamente, todas las soluciones generadas por A1[$\pi(n)$] son óptimas cuando la función objetivo consiste en mini-

mizar el coste de los contenedores, tal como sucede en este trabajo; no obstante, cuando la función objetivo corresponda a otro criterio de optimización, como es el caso del equilibrio de cargas de calor residual en los contenedores, A1[$\pi(n)$] puede utilizarse al menos de dos formas:

1. En la primera fase de algoritmos multiarranque (v.gr. GRASP) construyendo soluciones iniciales que se utilicen como semillas en la fase posterior de mejora basada en trayectorias en el espacio de búsqueda.
2. En la generación sistemática de soluciones para dar asistencia a metaheurísticas basadas en poblaciones (v.gr. algoritmos genéticos y meméticos).

4. Caso de estudio basado en la central nuclear Ascó

Esta sección está dedicada a un caso de estudio inspirado en la piscina de enfriamiento de elementos combustibles gastados en la central nuclear Ascó y contiene los puntos siguientes: (i) las hipótesis del modelo, (ii) los requisitos para el encapsulamiento del combustible gastado, (iii) los procedimientos empleados, (iv) los datos utilizados y (v) los resultados conseguidos.

4.1. Hipótesis para el caso

Se consideran las siguientes hipótesis para el caso que nos ocupa:

- H1. Los elementos combustibles están caracterizados por su tipo, grado de quemado (Burnup: MWd/t), enriquecimiento inicial (% en masa) y la fecha de extracción del núcleo según el último ciclo de quemado, lo cual se traduce en el tiempo que transcurre desde su última descarga del núcleo medido en años. A partir de estos datos, puede determinarse el calor residual de cada elemento en el instante de extracción de la piscina.
- H2. No se consideran los elementos combustibles dañados ni los que puedan estar afectados por otras restricciones adicionales.
- H3. No se consideran en el modelo los elementos asociados al combustible, tales como fuentes neutrónicas, barras de control, venenos consumibles y otros.
- H4. Se supone que sólo se dispone de un tipo de cápsula en cuanto a dimensiones espaciales físicas y número de posiciones para los elementos combustibles. La cápsula que se utiliza en este caso es del tipo MPC-32 y el contenedor que actúa de blindaje biológico durante algunas fases del proceso de carga es el HI-TRAC (transferencia).
- H5. Los elementos combustibles se cargan en contenedores teniendo en cuenta los requisitos de almacenado en módulos tipo HI-STORM (contenedor de almacenamiento); se supone, además, que no hay limitación de capacidad en la losa de hormigón del almacén temporal individualizado (ATI).
- H6. Se pretende el vaciado total de la piscina, si ello es posible, en una fecha determinada que puede corresponder a la del cese de operaciones en la central nuclear. Se consideran sólo los elementos presentes en la piscina en ese momento, es decir, no se ha considerado que en el caso de cese de operaciones el contenido del último núcleo se descargaría en la piscina y se debería contar con 157 elementos combustibles adicionales con diver-

sos grados de quemado. El contenido de la piscina que se ha considerado en el estudio no es el actual, sino que corresponde a una situación anterior en Ascó.

- H7. El vaciado de la piscina se debe realizar con el mínimo número de contenedores en la fecha más temprana posible. Se supone que la carga de los contenedores es instantánea, por lo que no es necesario cargar ningún contenedor antes de transcurridos 5 años tras la entrada en piscina del último elemento combustible.

4.2. Requisitos para el encapsulamiento de elementos combustibles

Los requisitos que se han tenido en cuenta para el vaciado de la piscina son estos:

- R.1. Los contenedores para los elementos combustibles son del tipo MPC-32, los cuales están compartimentados en 32 posiciones, pudiendo contener cada una un solo elemento (ver Figura 2).
- R.2. Las posiciones de un contenedor se agrupan en dos regiones: (R_a) región permisiva con alto límite de calor de decaimiento que está constituida por $h_a=12$ posiciones y (R_b) región severa con bajo límite de calor de decaimiento constituida por $h_b=20$ posiciones.
- R.3. Una posición de encapsulamiento de combustible (concepto para el que emplearemos el sustantivo latino *locus-loci*) puede albergar un elemento cuyo tiempo de enfriamiento debe ser mayor o igual al mínimo permitido, el cual corresponde a 5 años desde su extracción del núcleo del reactor por requisitos tecnológicos.
- R.4. El contenido de cada locus en todo contenedor debe poseer un calor de decaimiento inferior o igual al máximo permitido en el locus: q_a^+ en la región R_a y q_b^+ en la región R_b .
- R.5. El máximo calor residual permitido en toda cápsula MPC-32 es $Q_{MPC}^+=30$ kW.
- R.6. Los máximos valores tolerados para el calor de decaimiento en los loci se determinan según sea el caso:
 - Caso de carga uniforme: el máximo calor de decaimiento permitido por locus de la cápsula MPC-32 es igual a $q_a^+=q_b^+=0,9375$ kW (30 kW/32). Por tanto, si todos los elementos combustibles presentan un calor de decaimiento inferior o igual al límite de carga uniforme (i.e. $q_i(T) \leq 0,9375$ kW $\forall i \in I$), entonces, se empleará un solo tipo de contenedor y el problema tiene solución trivial.

- Caso de carga regionalizada: Cuando no es posible vaciar completamente la piscina empleando solo contenedores de carga uniforme, se utiliza la carga regionalizada [18]. Para determinar los valores máximos de calor de decaimiento por locus (q_a^+ o q_b^+) según la región a la que pertenece (R_a o R_b), se aplica el procedimiento que sigue:

- (1) Fijar un valor de la ratio de cargas térmicas máximas $\rho = (q_a^+) / (q_b^+)$, tal que: $1 \leq \rho \leq 3$.
- (2) Determinar la carga térmica máxima, $q_b^+ = q_b^+ (\rho, h_a, h_b)$, para la región severa R_b , a partir de la expresión:

$$(h_a \times \rho + h_b) \times q_0^+ (\rho, h_a, h_b) = f(\rho, h_a, h_b) \times Q_{MPC}^+ \quad (10)$$

Siendo $f(\rho, h_a, h_b)$ una función acotada a 1 para $\rho=1$ y decreciente con ρ , de manera que la carga térmica está penalizada por utilizar la opción de carga regionalizada. La función $f(\rho, h_a, h_b)$ para la cápsula MPC-32 es la siguiente:

$$f(\rho, h_a, h_b) = \frac{2}{(1 + \rho^{(0.23/\rho^{0.1})})} \quad (11)$$

- (3) Determinar la carga térmica máxima, $q_a^+ (\rho, h_a, h_b)$, para la región permisiva R_a :

$$q_a^+ (\rho, h_a, h_b) = q_b^+ (\rho, h_a, h_b) \times \rho \quad (12)$$

4.3. Datos y otras características del caso

Obviamente, la dimensión del modelo MILP-1 es función de la instancia empleada. En este trabajo utilizamos la instancia Ascó#01_6.0 (ver Tabla A1 en Anexo I) como juego de datos de calores de decaimiento. Las características principales del experimento son las que siguen:

- (1) El número de elementos combustibles gastados es igual a $n=1164$. Los elementos se identifican con los índices $i \in I$ correspondientes a los n primeros números naturales.
- (2) La fecha prevista para la extracción de elementos de la piscina es $T=6$ años desde el momento de cese de la actividad. Los calores de decaimiento $q_i(T) \quad \forall i \in I$ listados en la tabla A1 del Anexo I corresponden a $T=6$ años.
- (3) El número de tipos de región virtual de calor residual por posición, q en kW, es igual a $m=6$. Se consideran 6 regiones (sean: $R_j = \{q \in R: q \in [q_j^-, q_j^+]\} \quad \forall j=0,1,\dots,5$), las cuales se definen con intervalos cerrados de calor residual por locus. Las regiones se concretan a partir de tres valores de la ratio de cargas térmicas máximas: $\rho=1,2,3$. Sean:

$$R_0 = \{q \in R: q \in [0.00, 30]\}$$

$$R_1 = \{q \in R: q \in [0.00, 1.4250]\}$$

$$R_2 = \{q \in R: q \in [0.00, 1.2620]\}$$

$$R_3 = \{q \in R: q \in [0.00, 0.9375]\}$$

$$R_4 = \{q \in R: q \in [0.00, 0.6310]\}$$

$$R_5 = \{q \in R: q \in [0.00, 0.4750]\}$$

Por comodidad, las regiones virtuales han sido numeradas según el orden decreciente del límite superior $q_j^+ \quad \forall j$ de cada intervalo.

- (4) La definición de tipos de región virtual (R_0 a R_5) permite establecer la matriz de compatibilidad elemento-región $A(T)$, cuyos coeficientes tecnológicos adoptan el valor 1 si el elemento de combustible $i \in I$ puede ser asignado a una región virtual del tipo $j \in J$ en el instante T , y valen 0 en cualquier otro caso. Formalmente:

$$a_{i,j} \equiv a_{i,j}(T=6) = \begin{cases} 0, & \text{if } q_i(T=6) > q_j^+ \\ 1, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$$\forall i = 1, \dots, 1164; \forall j = 0, 1, \dots, 5$$

- (5) El número de tipos de contenedor es $l=3$ cuando prescindimos de la región virtual neutra R_0 que corresponde a la piscina. La correspondencia entre las regiones térmicas (R_1 a R_5) y los tipos reales de contenedor regionalizado (CR_1 a CR_3) se establece a través de la matriz B de compatibilidad región-contenedor, cuyos coeficientes $b_{j,k}$ valen 1 cuando la región R_j ($j=1,\dots,5$) está asociada al contenedor CR_k ($k=1,\dots,3$), y valen 0 en caso contrario. En nuestro caso, la matriz B es la que sigue:

$$B_{m \times l} = B_{5 \times 3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Así, un contenedor CR_1 está compartimentado en una región permisiva con las características de R_1 y una región severa asociada a R_5 ; un contenedor CR_2 está asociado a una región permisiva R_2 y a una severa R_4 ; y, finalmente, un contenedor tipo CR_3 posee una sola región con las cualidades de la región intermedia R_3 .

- (6) Desde el punto de vista tecnológico, todos los contenedores de este estudio corresponden a cápsulas MPC-32 (multi-purpose canister con 32 loci). Las 32 posiciones de una MPC-32 se reparten entre las regiones físicas de calor residual de la forma siguiente: 12 posiciones para la región permisiva y 20 para la severa. Obviamente, una MPC-32 tipo CR_3 posee 32 posiciones con el mismo límite superior para el calor residual: $q_3^+ = 0.9375$ kW por locus (30kW por cápsula).

- (7) Teniendo en cuenta que el número de tipos de contenedor es $l=3$, queda por definir el coste por uso de cada tipo de contenedor. Para medir el impacto sobre las soluciones que ofrece MILP-1 en función de los coeficientes de adversidad γ_k ($\forall k$), daremos valores distintos a la terna de costes arbitrarios $\vec{\gamma}=(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$.
- (8) Atendiendo a los valores y características expuestos en los puntos anteriores, las dimensiones del modelo MILP-1 para la instancia Ascó#01_6.0 son las que siguen: (i) 6984 variables de decisión binarias (x_{ij}) correspondientes a la asignación de elementos combustibles a regiones térmicas virtuales; (ii) 6 variables enteras (y_j) asociadas al número de elementos combustibles albergados por cada región térmica virtual; (iii) 4 variables enteras (z_k) representativas del número de contenedores de cada tipo; y (iv) 1195 restricciones o, bien, 1199 restricciones cuando se acota superiormente la disponibilidad de contenedores.

4.4. Procedimientos

Todos los códigos compilados correspondientes a los procedimientos utilizados han sido ejecutados en un ordenador DELL Inspiron-13 (Intel(R) Core(TM) i7-7500U @ 2.70 GHz CPU 2.90 GHz, 16 GB de RAM, x64 Windows 10 Pro).

Los modelos y herramientas utilizados para hallar las soluciones óptimas para el caso que nos ocupa son los que siguen:

- (1) Modelo MILP-1 basado en PLEM que permite minimizar el coste ($\Gamma^*(T)$) de los contenedores requeridos ($z_k^* \forall k$) para encapsular el combustible nuclear gastado que se halla en la piscina de la central nuclear. MILP-1 ofrece además el número de elementos contenidos en cada región ($y_j^* \forall j$), así como una asignación óptima ($x_{ij}^* \forall i \forall j$) de los elementos combustibles a tipos de regiones de calor de decaimiento. Para la explotación de MILP-1 se ha utilizado el solucionador IBM ILOG CPLEX (Optimization Studio v.12.2, win-x86-64).
- (2) Método exacto $A1[\pi(n)]$ que parte del resultado de MILP-1 y ofrece una asignación de los elementos combustibles a las regiones permisivas y severas de los contenedores.

En definitiva, a partir de una solución óptima hallada por MILP-1, la cual queda caracterizada por la terna de conjuntos de valores $[(x_{ij}^* \forall i \forall j), (y_j^* \forall j), (z_k^* \forall k)]$, se aplica el método exacto $A1[\pi(n)]$, el cual transfiere, de uno en uno y siguiendo una secuencia $\pi(n)$ según la regla P^* , los elementos combustibles localizados en las regiones virtuales R_j ($\forall j$) hacia las regiones físicas (permisiva y severa) de los contenedores CR_k ($\forall k$), utilizando la matriz B de compatibilidad región-contenedor.

4.5. Resultados

Para medir el impacto sobre las soluciones que ofrece MILP-1 en función de los coeficientes de adversidad γ_k ($\forall k$), se analizan 7 soluciones óptimas que corresponde a ejecutar MILP-1 fijando la terna de costes arbitrarios $\vec{\gamma}=(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ a los valores siguientes:

$$\vec{\gamma}_0=(1,1,1), \vec{\gamma}_1=(3,2,1), \vec{\gamma}_2=(3,1,2), \vec{\gamma}_3=(2,3,1)$$

$$\vec{\gamma}_4=(2,1,3), \vec{\gamma}_5=(1,3,2), \vec{\gamma}_6=(1,2,3)$$

Tras hallar cada solución óptima mediante MILP-1 $[(x_{ij}^* \forall i \forall j), (y_j^* \forall j), (z_k^* \forall k)]$, se aplica el Algoritmo $A1[\pi(n)]$ utilizando la secuencia de asignación $\pi(n)$ correspondiente al orden lexicográfico de los códigos de los elementos combustibles.

Los resultados globales de las 7 soluciones se recogen en la Tabla 1. Por otra parte, los resultados detallados de dichas soluciones óptimas, según $\vec{\gamma}=(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$, están disponibles en el Anexo I de la referencia [19].

Concretamente, en la Tabla 1 se recogen para cada solución (#0 a #6) los siguientes datos: (i) el coste imputado a cada tipo de contenedor ($\vec{\gamma}=(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$), (ii) el número óptimo de contenedores de cada tipo ($z_k^* \forall k$) y el número total (z_{tot}^*) de contenedores requeridos por cada solución, (iii) los valores óptimos de la función coste objetivo del modelo MILP-1 ($\Gamma^*(T)$), (iv) el calor residual medio correspondiente a la configuración de cada solución (Q_{med}), y (v) la desviación tipo del calor residual en el conjunto de cápsulas tipo ($\sigma(Q)$).

Tabla 1 Resumen de resultados de las 7 soluciones óptimas (#0 a #6) para la instancia Ascó#01_06 con las siguientes características técnicas: (i) 1164 elementos de combustible nuclear gastado, (ii) 6 años de cese de la actividad de los elementos, (iii) 6 regiones térmicas (incluida la región neutra) definidas por tres valores de la ratio de cargas térmicas máximas ρ (1, 2 y 3), y (iv) 4 tipos de contenedor incluido el contenedor neutro.

Solución #	γ_1	γ_2	γ_3	z_1^*	z_2^*	z_3^*	z_{tot}^*	Γ^* (T)	Q_{med}	$\sigma(Q)$
#0	1	1	1	4	17	16	37	37	22.7683	3.349247
#1	3	2	1	2	17	18	37	58	22.7683	3.287297
#2	3	1	2	2	23	12	37	53	22.7683	3.001163
#3	2	3	1	19	0	24	43	62	19.5914	4.421877
#4	2	1	3	2	54	0	56	58	15.0434	4.549144
#5	1	3	2	19	0	24	43	67	19.5914	4.605397
#6	1	2	3	40	16	0	56	72	15.0434	4.100421

En la Tabla 1 aparecen 3 soluciones óptimas que requieren 37 cápsulas, número que además coincide con el mínimo número de contenedores según la cota inferior ($\lceil 1164/32 \rceil$), no obstante, dichas soluciones presentan diferentes valores de la desviación tipo de la carga térmica en función de la configuración de las 37 cápsulas.

A modo de ejemplo, la solución #2, que es la que presenta menor dispersión de carga térmica entre las cápsulas, corresponde a la terna de costes $\vec{\gamma}_2=(3,1,2)$, en la cual se considera que la adversidad al uso de los contenedo-

res tipo 1 y 3 triplica y duplica, respectivamente, la de los contenedores de tipo 2. La solución #2 detallada se recoge en el Anexo II de este trabajo.

Atendiendo a la solución #2, la columna ECs de la Figura 3 muestra el número de elementos asignados a cada región ficticia, i.e. $y_1^*=24, y_2^*=274, y_3^*=369, y_4^*=457, y_5^*=40$. Esto se traduce en un requerimiento total de 37 cápsulas MPC-32 (ver columna MPC[z_k, h_j] de la Figura 3), cuyo reparto entre sus tipos 1, 2 y 3 corresponde a 2, 23 y 12 contenedores regionalizados, respectivamente.

Figura 3 Solución #2: número de elementos combustibles y de contenedores de cada región térmica

Zona	Límites Q-Zona	ECs	MPC-32	Límites Q-Región	MPC[z_k, h_j]
Zona 1	[1.2620, 1.4250]	24	T1-RA	[0.0000, 1.4250]	2 (12)
Zona 2	[0.9375, 1.2620]	274	T2-RA	[0.0000, 1.2620]	23 (12)
Zona 3	[0.6310, 0.9375]	369	T3-RAB	[0.0000, 0.9375]	12 (32)
Zona 4	[0.4750, 0.6310]	457	T2-RB	[0.0000, 0.6310]	23 (20)
Zona 5	[0.0000, 0.4750]	40	T1-RB	[0.0000, 0.4750]	2 (20)
Total elementos ECs		1164	Total cápsulas MPC-32		37 (32)

Por su parte, en la Figura 4 se muestra la carga detallada de la MPC-32 número 24 de la solución #2 (ver Anexo II). Dicha carga se caracteriza por los códigos de los elementos combustibles y por los calores residuales (kW) de estos.

En la Figura 4 podemos ver que la cápsula 24 de la solución #2 es del tipo 2 con una región permisiva $R_a \leftarrow R_2$ de 12 posiciones y una región severa $R_b \leftarrow R_4$ de 20. En la región R_a se han localizado los 12 elementos más calientes

de esta cápsula, de manera que el locus-1 está ocupado por el elemento combustible 827 con un calor residual de 1.2575 kW, mientras que en locus-12 (último de R_a) está localizado el elemento combustible 829 con un calor residual de 1.0519 kW. Por su parte, en la región severa R_b de la cápsula 24 están ubicados 20 elementos fríos en las posiciones 13 a 32, ocupando el elemento 1077 el locus-13 y el elemento 1068 el locus-32, siendo sus calores de decaimiento iguales a 0.5618 kW y 0.4490 kW, respectivamente.

Figura 4 Solución #2: códigos y calores residuales de los elementos combustibles de la MPC-32 número 24.

Cápsula 24 Tipo 2												
827	826	825	828	819	822	823	818	816	815	814	829	
1077	1072	1076	1069	1074	1073	1078	1082	1084	1086			
1087	1080	1071	1085	1070	1083	1081	1079	1075	1068			
Cápsula 24 Tipo 2 Q-A 14.3787 Q-B 10.0612 Q-AB 24.4399 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163												
1.2575	1.2510	1.2349	1.2317	1.2284	1.2252	1.2220	1.2124	1.1587	1.1556	1.1494	1.0519	
0.5618	0.5602	0.5554	0.5539	0.5351	0.5336	0.5336	0.5336	0.5321	0.5290			
0.5290	0.4677	0.4648	0.4604	0.4561	0.4561	0.4518	0.4490	0.4490	0.4490			

Otros resultados de interés mostrados en la Figura 4 son: (i) el calor residual en la MPC-32 número 24 que asciende a 24.4399 kW, (ii) el calor residual en la región permisiva R_a que es igual a 14.3787 kW, (iii) el calor residual en la región severa R_b cuyo valor es 10.0612 kW, (iv) el calor residual medio, igual a 22.7683 kW, correspondiente a la carga de elementos combustibles en los 37 contenedores que constituyen la solución #2, y, finalmente, (v) la desviación tipo de la carga térmica asociada a la solución #2, cuyo valor es $\sigma(Q)=3.001163$.

5. Conclusiones y líneas de trabajo futuras

La Programación lineal entera mixta se ha mostrado como una técnica de optimización competitiva para resolver problemas de minimización del coste de almacenaje de combustible nuclear. Esto se confirma a través de los experimentos que hemos realizado utilizando el modelo MILP-1 (diseñado para este trabajo e implementado en solucionador CPLEX) frente a la base de datos "ITEC-1394 Rev4.xlsm" suministrada por ENDESA. Dicha base permite generar instancias con dimensiones industriales (v.gr. 1200 elementos combustibles y de 1 a 30 tipos de contenedores regionalizados, lo cual se traduce en un número de tipos de regiones de calor de decaimiento comprendido entre 2 y 60).

El método propuesto aquí para el problema del encapsulamiento monoetápico del combustible nuclear gastado es computacionalmente competitivo en sus dos fases: programa matemático MILP-1 y algoritmo exacto A1. El modelo MILP-1 se utiliza para minimizar el coste de los contenedores requeridos para encapsular el combustible nuclear, ofreciendo como solución una asignación óptima de elementos combustibles a regiones térmicas virtuales, en menos de 0.5 segundos de CPU, usando instancias con 1500 elementos, 6 tipos de regiones y 4 tipos de contenedores. El algoritmo A1, que parte de una solución de MILP-1, es capaz de asignar los elementos a las regiones reales de los contenedores en menos de 0.25 segundos con los juegos de datos empleados.

En cuanto a investigaciones futuras, hemos previsto las siguientes líneas de actuación:

L1. Diseño de heurísticas relacionadas con el modelo MILP-1 para minimizar el coste de almacenamiento fijando el número de tipos de regiones térmicas

- L2. Formulación y explotación de otros modelos basados en Programación lineal entera mixta para asignar directamente los elementos combustibles a las regiones térmicas de los contenedores según diversos criterios de optimización.
- L3. Diseño de métodos heurísticos vinculados a la línea de trabajo L2 para equilibrar las cargas térmicas de los elementos combustibles en los contenedores [20].
- L4. Extensión de los modelos y procedimientos de las líneas anteriores al caso de carga polietápica para un horizonte de explotación de la central nuclear.

Agradecimientos:

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno de España con el proyecto OPTHEUS (ref. PGC2018-095080-B-I00), incluyendo Fondos para el desarrollo regional europeo, y el proyecto UPC "Desarrollo de herramientas para la simulación y optimización del vaciado de piscinas de combustible gastado de centrales nucleares" financiado por ENDESA Generación, S.A. Los autores agradecen también a la ASOCIACIÓN NUCLEAR ASCÓ-VANDELLÓS II (ANAV) el apoyo prestado y, especialmente, al Sr. Jordi Estrampes, jefe de Ingeniería del Reactor y Salvaguardias Nucleares de la CN Ascó, por sus consejos y aclaraciones.

6. Referencias

- Herranz LE, Penalva J, Fera F (2015) CFD analysis of a cask for spent fuel dry storage: Model fundamentals and sensitivity studies. *Annals of Nuclear Energy*, 76(2015): 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.09.032>.
- Wu Y, Klein J, Zhou H, Zuo L (2018) Thermal and fluid analysis of dry cask storage containers over multiple years of service. *Annals of Nuclear Energy*, 112(2018): 132-142. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.10.013>
- Sempértégui R, Bautista J, Griño R, Pereira J (2002) Models and procedures for Electric Energy Distribution Planning. A review. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(1): 395-400. <https://doi.org/10.3182/20020721-6-ES-1901.01217>.

- Paiva PC, Khodr HM, Dominguez-Navarro JA, Yusta JM, Urdaneta AJ (2005) Integral planning of primary-secondary distribution systems using mixed integer linear programming. *IEEE Transactions on Power Systems* 20 (2), 1134-1143.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.846108>
- Georgilakis PS, Hatzigargyriou ND (2015) A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research. *Electric Power Systems Research*, 121(2015): 89-100.
<https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2014.12.010>.
- Klyapovskiy S, You S, Cai H, Bindner HW (2019) Incorporate flexibility in distribution grid planning through a framework solution. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 111(2019): 66-78.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.03.069>.
- CSN (2020) El combustible nuclear y su ciclo. Monografía Consejo de Seguridad Nuclear.
<https://www.csn.es/el-combustible-nuclear-y-su-ciclo>.
- Merino AG, Gonzalez A (2019) Reliability methods in the design point of free-standing spent fuel racks under seismic conditions. *Progress in nuclear energy* 115, 208-220. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.03.021>
- Chen YS (2018). Thermal analysis for the integrated spent fuel pool of the Chinshan plant in the decommissioning process. *Annals of Nuclear Energy* 119, 163-174.
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.05.005>
- Yoo HS, Yoo SH, Kim ES (2019) Heat transfer enhancement in dry cask storage for nuclear spent fuel using additive high density inert gas. *Annals of Nuclear Energy* 132, 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.04.018>
- Batet L, León P, Serra E, Ciruelos J, Estrampes J, Culebras F (2018) Desarrollo de una herramienta de ayuda a la gestión y optimización de carga de contenedores de combustible gastado. SNE 44 Reunión anual de la Sociedad Nuclear Española, 26-28 septiembre 2018, Ávila (Spain).
- CSN (2015) Propuesta de dictamen técnico para la aprobación de la revisión 2 del certificado del modelo de bulto de transporte H1StAR 100, solicitada por ENRESA. Informe CSN/TFCN/II/REV.2/E-0120.
- Ruiz López MC, Orozco Hernández G, Zamora Martín F, García Leiva M (2015) Contenedores para el almacenamiento temporal y el transporte del combustible gastado. *aLFa (Revista de seguridad nuclear y protección radiológica. Consejo de Seguridad Nuclear)* 27: 8-15.
<https://www.csn.es/documents/10182/13557/Alfa+27>
- Penalva, JE; Fera, F; Herranz, LE (2014) Modelling of cladding thermal evolution along cask storage. *Proceedings 22nd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE22)*, 4, article Number: V004T08A012.
- Wu YJ, Klein J, Zhou HC, Zuo L (2018) Thermal and fluid analysis of dry cask storage containers over multiple years of service. *Annals of Nuclear Energy* 112, 132-142. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.10.013>
- Bautista J, Batet L, Mateo M (2020) Minimización del coste de almacenaje de combustible nuclear gastado en cápsulas MPC-32 con programación lineal entera mixta: Caso de carga en una etapa. Technical report OPE-WP.2020/01 (20200212).
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36331.90407/1>
- Bautista J (2020) Modelos y herramientas de decisión. Madrid: DEXTRA Editorial, (Capítulo 5).
- Holtec International (2008) FSAR, Final Safety Analysis Report for the HI-StORM 100 Cask System. Holtec Report No. HI-2002444, Rev. 7.
<https://www.nrc.gov/docs/ML0824/ML082401629.pdf>
- Bautista J, Batet L, Mateo M (2020) Soluciones con programación lineal entera mixta para el almacenamiento monoetápico del combustible nuclear gastado en cápsulas MPC-32 en la central nuclear Ascó 1. Technical report OPE-WP.2020/02 (20200520).
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14615.39845>
- Spencer KY, Tsvetkov PV, Janell JJ (2019) Validation of the GAMMA-PC methodology for dry cask loading optimization. *Progress in Nuclear Energy* 117, 2019, 103038.
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.04.009>

Anexo I: Instancia Ascó#01_06

i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$
1	0.4189	41	0.4189	81	0.6098	121	0.6296	161	0.5789
2	0.4189	42	0.4189	82	0.6098	122	0.6332	162	0.5302
3	0.4189	43	0.4189	83	0.5789	123	0.6296	163	0.5858
4	0.4189	44	0.4189	84	0.6010	124	0.5927	164	0.5335
5	0.4189	45	0.4189	85	0.5772	125	0.5335	165	0.5351
6	0.4189	46	0.4189	86	0.5236	126	0.6917	166	0.5327
7	0.4189	47	0.4189	87	0.5302	127	0.6898	167	0.5434
8	0.4189	48	0.4189	88	0.5302	128	0.6165	168	0.5418
9	0.4189	49	0.4189	89	0.5772	129	0.6147	169	0.5302
10	0.4189	50	0.4189	90	0.6049	130	0.7068	170	0.6955
11	0.4189	51	0.4189	91	0.5962	131	0.4942	171	0.7052
12	0.4189	52	0.4189	92	0.6101	132	0.6183	172	0.5055
13	0.4189	53	0.4189	93	0.5302	133	0.6917	173	0.5039
14	0.4189	54	0.5979	94	0.4772	134	0.4925	174	0.5813
15	0.4189	55	0.5841	95	0.4820	135	0.6363	175	0.5088
16	0.4189	56	0.5789	96	0.4756	136	0.4942	176	0.5270
17	0.4189	57	0.5789	97	0.4836	137	0.4909	177	0.5844
18	0.4189	58	0.5962	98	0.4740	138	0.4958	178	0.5064
19	0.4189	59	0.5818	99	0.4836	139	0.4974	179	0.5253
20	0.4189	60	0.6080	100	0.4756	140	0.7105	180	0.5031
21	0.4189	61	0.5384	101	0.4756	141	0.4925	181	0.5072
22	0.4189	62	0.6084	102	0.5335	142	0.7442	182	0.5270
23	0.4189	63	0.5310	103	0.6350	143	0.6112	183	0.6917
24	0.4189	64	0.5766	104	0.5979	144	0.6898	184	0.5831
25	0.4189	65	0.5732	105	0.6296	145	0.4974	185	0.6973
26	0.4189	66	0.5784	106	0.5962	146	0.5875	186	0.5023
27	0.4189	67	0.6014	107	0.6385	147	0.5451	187	0.5253
28	0.4189	68	0.5801	108	0.5997	148	0.5853	188	0.5848
29	0.4189	69	0.5562	109	0.5962	149	0.5343	189	0.5990
30	0.4189	70	0.5721	110	0.5979	150	0.5401	190	0.5467
31	0.4189	71	0.5766	111	0.5335	151	0.5335	191	0.5973
32	0.4189	72	0.5477	112	0.5997	152	0.5451	192	0.5533
33	0.4189	73	0.5704	113	0.5979	153	0.5858	193	0.5973
34	0.4189	74	0.5477	114	0.5962	154	0.5444	194	0.5500
35	0.4189	75	0.5835	115	0.6860	155	0.5318	195	0.6571
36	0.4189	76	0.5302	116	0.5351	156	0.5418	196	0.6571
37	0.4189	77	0.5484	117	0.5962	157	0.5434	197	0.5417
38	0.4189	78	0.5318	118	0.5940	158	0.5910	198	0.5417
39	0.4189	79	0.5749	119	0.6347	159	0.5905	199	0.6535
40	0.4189	80	0.6098	120	0.6010	160	0.5841	200	0.6094

Tabla A1 (1 de 6): Conjunto de elementos combustibles correspondiente a la instancia ASCÓ#01_6.0. Las características son: identificador i del elemento y calor residual $q_i(T)$ para $T=6$ años.

i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$
201	0.5533	241	0.6460	281	0.6320	321	0.7184	361	0.6802
202	0.5973	242	0.6442	282	0.6337	322	0.7203	362	0.6972
203	0.6553	243	0.6442	283	0.6372	323	0.6904	363	0.6839
204	0.5939	244	0.7673	284	0.6442	324	0.7184	364	0.6991
205	0.5500	245	0.6028	285	0.6512	325	0.7146	365	0.6915
206	0.6025	246	0.7593	286	0.6460	326	0.7071	366	0.8315
207	0.5533	247	0.6285	287	0.7199	327	0.7128	367	0.8274
208	0.5550	248	0.6079	288	0.7180	328	0.7071	368	0.8336
209	0.6007	249	0.6199	289	0.6543	329	0.7109	369	0.8315
210	0.5384	250	0.6407	290	0.7238	330	0.7090	370	0.8212
211	0.6172	251	0.5977	291	0.6507	331	0.7071	371	0.8336
212	0.5351	252	0.6233	292	0.6490	332	0.7109	372	0.8233
213	0.6154	253	0.6216	293	0.6525	333	0.7034	373	0.8482
214	0.5360	254	0.6407	294	0.6525	334	0.7222	374	0.9784
215	0.6154	255	0.7813	295	0.6472	335	0.7165	375	0.9710
216	0.5394	256	0.6199	296	0.6490	336	0.7146	376	0.9759
217	0.5477	257	0.6062	297	0.6507	337	0.7128	377	0.9858
218	0.5236	258	0.6477	298	0.6454	338	0.6757	378	0.9735
219	0.6101	259	0.6495	299	0.6454	339	0.6794	379	0.9784
220	0.7112	260	0.6079	300	0.6578	340	0.6775	380	0.9759
221	0.5484	261	0.6425	301	0.6543	341	0.6794	381	0.9883
222	0.6119	262	0.6390	302	0.6525	342	0.6757	382	0.7239
223	0.5360	263	0.6477	303	0.7753	343	0.6775	383	0.7182
224	0.6154	264	0.6045	304	0.7793	344	0.6775	384	0.7258
225	0.5236	265	0.6045	305	0.7117	345	0.6757	385	0.7239
226	0.5494	266	0.6407	306	0.7117	346	0.6218	386	0.8357
227	0.5351	267	0.6045	307	0.7733	347	0.4535	387	0.8357
228	0.5477	268	0.6285	308	0.7713	348	0.6261	388	0.7599
229	0.5368	269	0.6390	309	0.7097	349	0.6261	389	0.7638
230	0.5410	270	0.6320	310	0.7203	350	0.4566	390	0.7677
231	0.5351	271	0.6320	311	0.7184	351	0.6244	391	0.8315
232	0.6137	272	0.6355	312	0.7165	352	0.6279	392	0.7658
233	0.6101	273	0.6320	313	0.7241	353	0.4520	393	0.7638
234	0.6442	274	0.6355	314	0.6923	354	0.6289	394	0.7638
235	0.6303	275	0.6337	315	0.7184	355	0.6244	395	0.7638
236	0.6512	276	0.6372	316	0.6923	356	0.4489	396	0.7284
237	0.6165	277	0.6355	317	0.6904	357	0.6307	397	0.7717
238	0.6355	278	0.6407	318	0.7260	358	0.6783	398	0.7638
239	0.6407	279	0.6251	319	0.7165	359	0.6915	399	0.7343
240	0.6233	280	0.6372	320	0.7203	360	0.6839	400	0.7323

Tabla A1 (2 de 6): Conjunto de elementos combustibles correspondiente a la instancia Ascó#01_6.0. Las características son: identificador i del elemento y calor residual $q_i(T)$ para $T=6$ años.

i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$
401	0.8441	441	0.8820	481	0.7903	521	0.8030	561	0.8460
402	0.7304	442	0.8952	482	0.8128	522	0.7968	562	1.0201
403	0.7677	443	0.8864	483	0.7801	523	0.9134	563	0.7901
404	0.7677	444	0.8886	484	0.8086	524	0.8974	564	1.0176
405	0.7658	445	0.8908	485	0.8066	525	0.8134	565	1.0126
406	0.7658	446	0.8842	486	0.8046	526	0.8303	566	0.7989
407	0.7483	447	0.8908	487	0.8256	527	0.8345	567	1.0226
408	0.7386	448	0.8886	488	0.8128	528	0.8367	568	0.7814
409	0.7638	449	0.9063	489	0.8107	529	0.8345	569	0.7836
410	0.7463	450	0.7704	490	0.7882	530	0.8303	570	0.7923
411	0.7483	451	0.7644	491	0.8213	531	0.8113	571	0.7879
412	0.7483	452	0.7724	492	0.8046	532	0.8134	572	1.0126
413	0.7521	453	0.7704	493	0.7903	533	0.8197	573	1.0151
414	0.7502	454	0.7882	494	0.8149	534	0.8093	574	1.0076
415	0.7560	455	0.7700	495	0.8087	535	0.8155	575	0.7901
416	0.7463	456	0.7720	496	0.8192	536	0.8218	576	0.7749
417	0.7463	457	0.7781	497	0.7882	537	0.8218	577	1.0201
418	0.7502	458	0.7744	498	1.0027	538	0.8303	578	1.0076
419	0.7502	459	0.7781	499	0.9203	539	0.8093	579	1.0026
420	0.7463	460	0.7680	500	0.9955	540	0.8155	580	1.0026
421	0.7406	461	0.7943	501	0.9955	541	0.8239	581	1.0026
422	0.7776	462	0.7923	502	0.9249	542	0.8261	582	0.8483
423	0.7736	463	0.7882	503	1.0027	543	0.8197	583	0.8329
424	0.7795	464	0.7842	504	0.9180	544	0.8134	584	0.8329
425	0.7677	465	0.7903	505	0.9111	545	0.8218	585	0.8417
426	0.7680	466	0.7842	506	0.9180	546	0.8439	586	0.8395
427	0.7720	467	0.7903	507	0.9295	547	0.8218	587	0.8505
428	0.7620	468	0.7882	508	0.9931	548	0.8527	588	0.8329
429	0.7560	469	0.7903	509	0.9907	549	0.8351	589	0.8549
430	0.7640	470	0.8579	510	0.9835	550	0.8197	590	0.8615
431	0.7540	471	0.7680	511	0.9157	551	0.8395	591	0.8483
432	0.7640	472	0.7720	512	0.9157	552	0.8197	592	0.8527
433	0.7640	473	0.8601	513	0.9835	553	0.8155	593	0.8571
434	0.8666	474	0.8514	514	1.1306	554	0.8218	594	0.8460
435	0.8558	475	0.7700	515	1.1223	555	0.8218	595	0.8505
436	0.8623	476	0.7761	516	1.1278	556	0.8483	596	0.8571
437	0.8623	477	0.8492	517	1.1389	557	0.8460	597	0.8571
438	0.8558	478	0.7903	518	0.8030	558	0.8373	598	0.8929
439	0.8710	479	0.7923	519	0.8997	559	0.8197	599	0.8816
440	0.8688	480	0.7943	520	0.8907	560	0.8218	600	0.8839

Tabla A1 (3 de 6): Conjunto de elementos combustibles correspondiente a la instancia Ascó#01_6.0. Las características son: identificador i del elemento y calor residual $q_i(T)$ para $T=6$ años.

i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$
601	0.8839	641	1.0679	681	0.9130	721	0.9762	761	1.3706
602	0.8285	642	1.0652	682	1.0603	722	0.9609	762	1.3436
603	0.8929	643	1.0412	683	0.9036	723	0.9660	763	1.3368
604	0.8861	644	1.0254	684	0.9177	724	0.9762	764	0.9667
605	0.8460	645	1.0733	685	0.9130	725	1.0716	765	1.0631
606	0.8351	646	1.1196	686	0.9059	726	0.9788	766	1.0547
607	0.8351	647	1.1278	687	0.9201	727	0.9559	767	1.0491
608	0.8839	648	1.1168	688	0.9012	728	1.0859	768	1.0575
609	0.8907	649	1.1278	689	0.8989	729	1.0802	769	1.0830
610	0.8771	650	0.8965	690	1.2510	730	1.0830	770	1.0688
611	0.8549	651	0.8872	691	1.2543	731	0.9635	771	1.0660
612	0.8727	652	0.8895	692	0.9012	732	0.9813	772	1.0745
613	0.8727	653	0.8942	693	1.2380	733	1.0631	773	1.0716
614	0.9916	654	0.8895	694	1.1614	734	0.9839	774	1.0745
615	0.8771	655	0.8918	695	1.2502	735	1.0631	775	1.0603
616	0.8549	656	0.8965	696	1.2336	736	1.0575	776	1.0716
617	0.8549	657	0.8918	697	1.1614	737	0.9788	777	1.0859
618	0.8615	658	0.9036	698	1.2367	738	1.0547	778	1.2543
619	0.9890	659	0.8965	699	1.1526	739	0.9813	779	1.2510
620	0.8749	660	0.8918	700	1.1496	740	0.9762	780	1.0773
621	0.8794	661	1.0679	701	1.1555	741	0.9762	781	1.0688
622	0.8704	662	1.2543	702	1.2428	742	0.9813	782	1.2575
623	0.9994	663	1.0706	703	1.2367	743	1.0547	783	1.2510
624	0.9890	664	1.0679	704	1.2306	744	1.0660	784	1.0745
625	0.8749	665	1.2575	705	1.2306	745	1.0547	785	1.0973
626	1.1196	666	0.9106	706	1.1585	746	0.9890	786	1.0887
627	1.1168	667	1.2381	707	1.1485	747	0.9788	787	1.0973
628	1.1306	668	0.9083	708	1.2367	748	1.0603	788	1.0944
629	1.1141	669	1.0599	709	0.9433	749	0.9640	789	1.2543
630	1.0868	670	1.0760	710	0.9408	750	1.3368	790	1.0916
631	1.0439	671	0.9083	711	0.9383	751	1.3740	791	1.0916
632	1.0814	672	1.0706	712	0.9408	752	1.3638	792	1.2608
633	1.0652	673	1.0572	713	0.9584	753	1.3234	793	1.2608
634	1.0519	674	1.0652	714	1.1233	754	0.9775	794	1.2608
635	1.0733	675	0.8965	715	1.1175	755	1.3335	795	1.0944
636	1.0281	676	1.2543	716	0.9534	756	1.3436	796	1.0887
637	1.0412	677	0.9059	717	0.9458	757	1.3301	797	0.8749
638	1.0439	678	0.9036	718	1.1146	758	1.3503	798	1.1093
639	1.0333	679	0.9012	719	1.1204	759	1.3672	799	0.8724
640	1.0733	680	0.9059	720	0.9508	760	0.9721	800	0.8698

Tabla A1 (4 de 6): Conjunto de elementos combustibles correspondiente a la instancia Ascó#01_6.0. Las características son: identificador i del elemento y calor residual $q_i(T)$ para $T=6$ años.

i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$
801	1.1093	841	1.2124	881	0.4651	921	0.4902	961	0.5179
802	0.8826	842	1.2478	882	0.4603	922	0.4934	962	0.4312
803	1.1124	843	1.2060	883	0.5223	923	0.5558	963	0.5148
804	1.1185	844	1.1997	884	0.4571	924	0.5507	964	0.5179
805	1.1154	845	1.2156	885	0.4651	925	0.4885	965	0.4439
806	1.1185	846	1.2029	886	0.5156	926	0.5167	966	0.4397
807	0.8673	847	1.2124	887	0.5426	927	0.4546	967	0.4213
808	0.8749	848	1.2446	888	0.5273	928	0.4771	968	0.5256
809	0.8673	849	1.2510	889	0.5240	929	0.4755	969	0.4368
810	1.1124	850	1.2060	890	0.4492	930	0.5576	970	0.4326
811	1.1093	851	1.2092	891	0.4196	931	0.5167	971	0.4656
812	0.8749	852	1.2381	892	0.5206	932	0.4117	972	0.5148
813	1.1556	853	0.5923	893	0.4555	933	0.4656	973	0.4641
814	1.1494	854	0.5947	894	0.5223	934	0.5015	974	0.5133
815	1.1556	855	0.5947	895	0.4667	935	0.4312	975	0.5027
816	1.1587	856	0.5923	896	0.4603	936	0.6366	976	0.5012
817	0.5207	857	0.4069	897	0.4571	937	0.6114	977	0.4354
818	1.2124	858	0.3913	898	0.4135	938	0.6120	978	0.4583
819	1.2284	859	0.5159	899	0.5477	939	0.4651	979	0.4354
820	0.5186	860	0.3975	900	0.5140	940	0.5190	980	0.4598
821	0.5123	861	0.4292	901	0.5409	941	0.4731	981	0.5240
822	1.2252	862	0.3975	902	0.4196	942	0.5257	982	0.4368
823	1.2220	863	0.3975	903	0.5173	943	0.4635	983	0.4326
824	0.5207	864	0.3975	904	0.5460	944	0.4476	984	0.4997
825	1.2349	865	0.4038	905	0.5206	945	0.5477	985	0.5256
826	1.2510	866	0.4785	906	0.4619	946	0.4683	986	0.5287
827	1.2575	867	0.4022	907	0.5140	947	0.5210	987	0.5012
828	1.2317	868	0.4651	908	0.5190	948	0.5012	988	0.4997
829	1.0519	869	0.3975	909	0.4539	949	0.4354	989	0.5318
830	1.2349	870	0.5133	910	0.4587	950	0.4700	990	0.5302
831	1.2641	871	0.5234	911	0.4603	951	0.5012	991	0.5042
832	1.0609	872	0.4372	912	0.4089	952	0.4656	992	0.5019
833	1.0639	873	0.4836	913	0.5240	953	0.4744	993	0.5925
834	1.0639	874	0.4325	914	0.5140	954	0.4554	994	0.5033
835	1.2575	875	0.5477	915	0.4594	955	0.4298	995	0.4945
836	1.2349	876	0.4635	916	0.4820	956	0.4554	996	0.5957
837	1.2543	877	0.5223	917	0.4820	957	0.4656	997	0.4931
838	1.2092	878	0.4524	918	0.4787	958	0.4729	998	0.5019
839	1.2478	879	0.5426	919	0.4562	959	0.4368	999	0.4901
840	0.5375	880	0.5375	920	0.5455	960	0.4714	1000	0.4887

Tabla A1 (5 de 6): Conjunto de elementos combustibles correspondiente a la instancia Ascó#01_6.0. Las características son: identificador i del elemento y calor residual $q_i(T)$ para $T=6$ años.

i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$	i	$q_i(T)$
1001	0.4960	1042	0.5713	1083	0.4561	1124	0.6924
1002	0.5033	1043	0.4706	1084	0.5321	1125	0.6690
1003	0.4901	1044	0.4691	1085	0.4604	1126	0.6654
1004	0.5048	1045	0.4576	1086	0.5290	1127	0.6672
1005	0.4989	1046	0.5681	1087	0.5290	1128	0.6690
1006	0.6005	1047	0.4547	1088	0.4764	1129	0.6708
1007	0.4960	1048	0.4590	1089	0.4750	1130	0.6672
1008	0.6021	1049	0.5713	1090	0.5649	1131	0.6690
1009	0.5989	1050	0.4706	1091	0.5539	1132	0.6708
1010	0.4887	1051	0.4750	1092	0.5398	1133	0.7097
1011	0.5989	1052	0.4735	1093	0.5554	1134	0.6407
1012	0.4975	1053	0.4720	1094	0.4604	1135	0.7146
1013	0.5973	1054	0.4532	1095	0.4706	1136	0.7184
1014	0.6053	1055	0.4794	1096	0.4720	1137	0.7222
1015	0.5470	1056	0.4750	1097	0.4547	1138	0.7146
1016	0.5078	1057	0.5382	1098	0.5602	1139	0.7203
1017	0.5122	1058	0.5305	1099	0.4677	1140	0.6794
1018	0.5063	1059	0.4662	1100	0.4461	1141	0.6739
1019	0.5348	1060	0.4504	1101	0.4677	1142	0.6720
1020	0.5424	1061	0.4518	1102	0.4518	1143	0.7146
1021	0.5394	1062	0.4490	1103	0.5336	1144	0.6789
1022	0.4613	1063	0.5382	1104	0.4677	1145	0.7203
1023	0.4628	1064	0.4576	1105	0.6512	1146	0.7165
1024	0.4585	1065	0.4633	1106	0.6460	1147	0.7165
1025	0.5394	1066	0.4619	1107	0.6407	1148	0.6739
1026	0.4628	1067	0.4619	1108	0.6372	1149	0.6720
1027	0.4599	1068	0.4490	1109	0.6407	1150	0.7053
1028	0.5078	1069	0.5539	1110	0.6390	1151	0.7260
1029	0.5152	1070	0.4561	1111	0.6477	1152	0.6684
1030	0.5078	1071	0.4648	1112	0.6390	1153	0.7203
1031	0.5122	1072	0.5602	1113	0.6337	1154	0.7184
1032	0.4599	1073	0.5336	1114	0.6530	1155	0.6734
1033	0.4599	1074	0.5351	1115	0.6565	1156	0.7146
1034	0.5409	1075	0.4490	1116	0.6601	1157	0.7090
1035	0.4585	1076	0.5554	1117	0.6548	1158	0.7260
1036	0.5152	1077	0.5618	1118	0.6495	1159	0.7593
1037	0.5363	1078	0.5336	1119	0.6548	1160	0.7494
1038	0.5048	1079	0.4490	1120	0.6601	1161	0.7475
1039	0.5409	1080	0.4677	1121	0.6905	1162	0.7279
1040	0.5237	1081	0.4518	1122	0.6924	1163	0.7534
1041	0.5713	1082	0.5336	1123	0.6924	1164	0.7713

Tabla A1 (6 de 6): Conjunto de elementos combustibles correspondiente a la instancia Ascó#01_6.0. Las características son: identificador i del elemento y calor residual $q_i(T)$ para $T=6$ años.

Anexo II: Configuración de cápsulas Solución #2

Solución #2 (3 1 2): Listado de carga de elementos combustibles en cápsulas MPC-32

Cápsula 1 Tipo 1

751	761	759	752	758	756	762	750	763	755	757	753
41	42	45	47	48	49	52	53	9	18		
27	28	29	30	31	33	34	35	36	37		

Cápsula 2 Tipo 1

831	849	842	839	848	841	847	851	850	843	846	844
1051	1056	896	1033	1024	1035	897	884	919	878		
1061	1060	982	977	967	902	891	932	912	860		

Cápsula 3 Tipo 2

255	244	285	259	263	242	250	254	278	239	269	272
14	15	16	17	19	20	21	22	1	2		
3	4	5	6	7	8	10	11	12	13		

Cápsula 4 Tipo 2

307	318	313	310	287	311	321	306	301	294	291	299
60	54	58	55	59	57	56	39	40	43		
44	46	50	51	23	24	25	26	32	38		

Cápsula 5 Tipo 2

366	325	327	329	330	331	333	323	361	341	358	338
80	62	67	75	68	66	64	71	79	65		
70	73	69	77	72	74	61	78	63	76		

Cápsula 6 Tipo 2

381	377	379	374	380	376	378	375	368	372	370	383
92	82	81	90	84	91	83	89	85	87		
88	93	86	97	99	95	94	96	100	98		

Cápsula 7 Tipo 2

403	392	406	398	389	394	409	411	412	416	400	385
105	121	123	120	112	108	110	104	113	117		
109	106	114	118	124	116	102	111	125	101		

Cápsula 8 Tipo 2

449	445	444	441	440	434	422	426	428	419	418	420
132	128	129	143	146	153	148	152	147	150		
149	151	139	145	138	131	136	134	141	137		

Cápsula 9 Tipo 2

474	489	485	486	462	468	457	452	453	450	460	451
158	159	163	160	174	161	154	167	157	168		
156	165	164	166	155	169	162	175	172	173		

Cápsula 10 Tipo 2

517	514	516	515	498	503	501	500	508	509	510	513
200	189	193	191	188	177	184	192	194	190		
198	197	182	176	179	187	181	178	180	186		

Cápsula 11 Tipo 2

567	562	577	564	573	565	572	574	578	579	580	581
211	213	215	222	219	206	209	202	204	208		
207	201	205	221	217	216	210	214	212	218		

Cápsula 12 Tipo 2

628	626	627	629	630	632	633	631	623	614	619	624
235	247	240	252	249	237	224	232	233	248		
245	251	226	228	230	229	223	231	227	225		

Cápsula 13 Tipo 2

635	640	645	641	642	634	638	643	637	639	636	644
354	268	352	348	349	279	351	355	346	253		
256	260	257	264	265	267	350	347	353	356		

Cápsula 14 Tipo 2

665	662	667	649	647	646	648	670	663	664	661	669
357	854	855	853	856	840	824	817	820	859		
821	866	861	857	865	867	862	863	864	858		

Cápsula 15 Tipo 2

676	691	690	695	693	696	694	697	672	674	682	673
875	879	887	880	888	889	871	883	877	886		
870	873	868	885	881	876	882	872	874	869		

Cápsula 16 Tipo 2

702	698	703	708	705	704	706	701	699	700	707	709
899	904	901	913	894	905	892	908	903	900		
907	914	895	906	911	910	893	909	890	898		

Cápsula 17 Tipo 2

714	719	715	718	721	713	716	720	717	712	710	711
937	930	923	924	920	931	926	934	922	921		
925	917	916	918	928	929	933	915	927	935		

Cápsula 18 Tipo 2

728	730	729	725	733	732	726	724	723	731	722	727
938	945	942	947	940	948	951	953	941	950		
946	952	957	939	943	956	954	944	949	955		

Cápsula 19 Tipo 2

744	735	736	743	738	745	734	742	739	737	740	741
968	964	961	963	972	974	975	976	958	960		
971	973	978	965	966	969	959	979	970	962		

Cápsula 20 Tipo 2

769	765	748	768	766	767	746	747	754	760	764	749
996	993	989	990	986	985	981	991	994	992		
998	987	984	988	995	997	999	1000	980	983		

Cápsula 21 Tipo 2

778	779	777	780	772	774	773	776	770	781	771	775
1014	1008	1006	1011	1009	1013	1015	1020	1019	1017		
1016	1018	1004	1002	1005	1012	1001	1007	1003	1010		

Cápsula 22 Tipo 2

792	793	782	789	783	787	785	788	790	791	786	784
1041	1042	1034	1039	1021	1025	1037	1040	1036	1029		
1031	1028	1030	1038	1043	1026	1023	1022	1032	1027		

Cápsula 23 Tipo 2

794	813	806	804	805	810	803	798	811	801	795	796
1049	1046	1057	1063	1058	1055	1052	1053	1050	1044		
1059	1065	1066	1067	1048	1064	1045	1047	1054	1062		

Cápsula 24 Tipo 2

827	826	825	828	819	822	823	818	816	815	814	829
1077	1072	1076	1069	1074	1073	1078	1082	1084	1086		
1087	1080	1071	1085	1070	1083	1081	1079	1075	1068		

Cápsula 25 Tipo 2

835	837	852	830	836	845	838	833	834	832	1090	1098
1093	1091	1092	1103	1088	1089	1096	1095	1101	1099		
1104	1094	1097	1102	1100	0	0	0	0	0		

Cápsula 27 Tipo 3

Cápsula 28 Tipo 3

Cápsula 29 Tipo 3

Cápsula 30 Tipo 3

Cápsula 31 Tipo 3

Cápsula 32 Tipo 3

Cápsula 33 Tipo 3

Cápsula 34 Tipo 3

Cápsula 35 Tipo 3

Cápsula 36 Tipo 3

Cápsula 37 Tipo 3

[illegible]

Solución #2 (3 1 2): Listado de carga del calor residual (decaimiento) en cápsulas MPC-32

Cápsula 1 Tipo 1 Q-A 16.1737 Q-B 8.3780 Q-AB 24.5517 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163

1.3740 1.3706 1.3672 1.3638 1.3503 1.3436 1.3436 1.3368 1.3368 1.3335 1.3301 1.3234
 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189
 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189

Cápsula 2 Tipo 1 Q-A 14.7039 Q-B 8.8630 Q-AB 23.5669 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163

1.2641 1.2510 1.2478 1.2478 1.2446 1.2124 1.2124 1.2092 1.2060 1.2060 1.2029 1.1997
 0.4750 0.4750 0.4603 0.4599 0.4585 0.4585 0.4571 0.4571 0.4562 0.4524
 0.4518 0.4504 0.4368 0.4354 0.4213 0.4196 0.4196 0.4117 0.4089 0.3975

Cápsula 3 Tipo 2 Q-A 7.9785 Q-B 8.3780 Q-AB 16.3565 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163

0.7813 0.7673 0.6512 0.6495 0.6477 0.6442 0.6407 0.6407 0.6407 0.6407 0.6390 0.6355
 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189
 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189

Cápsula 4 Tipo 2 Q-A 8.4150 Q-B 9.5715 Q-AB 17.9865 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163

0.7733 0.7260 0.7241 0.7203 0.7199 0.7184 0.7184 0.7117 0.6543 0.6525 0.6507 0.6454
 0.6080 0.5979 0.5962 0.5841 0.5818 0.5789 0.5789 0.4189 0.4189 0.4189
 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189 0.4189

Cápsula 5 Tipo 2 Q-A 8.4933 Q-B 11.3368 Q-AB 19.8301 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163

0.8315 0.7146 0.7128 0.7109 0.7090 0.7071 0.7034 0.6904 0.6802 0.6794 0.6783 0.6757
 0.6098 0.6084 0.6014 0.5835 0.5801 0.5784 0.5766 0.5766 0.5749 0.5732
 0.5721 0.5704 0.5562 0.5484 0.5477 0.5477 0.5384 0.5318 0.5310 0.5302

Cápsula 6 Tipo 2 Q-A 11.0235 Q-B 10.8309 Q-AB 21.8544 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163

0.9883 0.9858 0.9784 0.9784 0.9759 0.9759 0.9735 0.9710 0.8336 0.8233 0.8212 0.7182
 0.6101 0.6098 0.6098 0.6049 0.6010 0.5962 0.5789 0.5772 0.5772 0.5302
 0.5302 0.5302 0.5236 0.4836 0.4836 0.4820 0.4772 0.4756 0.4756 0.4740

Cápsula 7 Tipo 2 Q-A 9.0536 Q-B 11.6656 Q-AB 20.7192 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163

0.7677 0.7658 0.7658 0.7638 0.7638 0.7638 0.7638 0.7483 0.7483 0.7463 0.7323 0.7239
 0.6296 0.6296 0.6296 0.6010 0.5997 0.5997 0.5979 0.5979 0.5979 0.5962
 0.5962 0.5962 0.5962 0.5940 0.5927 0.5351 0.5335 0.5335 0.5335 0.4756

Cápsula 8 Tipo 2 Q-A 9.8574 Q-B 10.8723 Q-AB 20.7297 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163

0.9063 0.8908 0.8886 0.8820 0.8688 0.8666 0.7776 0.7680 0.7620 0.7502 0.7502 0.7463
 0.6183 0.6165 0.6147 0.6112 0.5875 0.5858 0.5853 0.5451 0.5451 0.5401
 0.5343 0.5335 0.4974 0.4974 0.4958 0.4942 0.4942 0.4925 0.4925 0.4909

Cápsula 9 Tipo 2 Q-A 9.4775 Q-B 10.9381 Q-AB 20.4156 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163

0.8514 0.8107 0.8066 0.8046 0.7923 0.7882 0.7781 0.7724 0.7704 0.7704 0.7680 0.7644
 0.5910 0.5905 0.5858 0.5841 0.5813 0.5789 0.5444 0.5434 0.5434 0.5418
 0.5418 0.5351 0.5335 0.5327 0.5318 0.5302 0.5302 0.5088 0.5055 0.5039

Cápsula 10 Tipo 2 Q-A 12.4668 Q-B 11.0123 Q-AB 23.4791 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163

1.1389 1.1306 1.1278 1.1223 1.0027 1.0027 0.9955 0.9955 0.9931 0.9907 0.9835 0.9835
 0.6094 0.5990 0.5973 0.5973 0.5848 0.5844 0.5831 0.5533 0.5500 0.5467
 0.5417 0.5417 0.5270 0.5270 0.5253 0.5253 0.5072 0.5064 0.5031 0.5023

Cápsula 11 Tipo 2 Q-A 12.1437 Q-B 11.4446 Q-AB 23.5883 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163

1.0226 1.0201 1.0201 1.0176 1.0151 1.0126 1.0126 1.0076 1.0076 1.0026 1.0026 1.0026
 0.6172 0.6154 0.6154 0.6119 0.6101 0.6025 0.6007 0.5973 0.5939 0.5550
 0.5533 0.5533 0.5500 0.5484 0.5477 0.5394 0.5384 0.5360 0.5351 0.5236

Cápsula 12 Tipo 2 Q-A 12.7274 Q-B 11.6941 Q-AB 24.4215 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163

1.1306 1.1196 1.1168 1.1141 1.0868 1.0814 1.0652 1.0439 0.9994 0.9916 0.9890 0.9890
 0.6303 0.6285 0.6233 0.6233 0.6199 0.6165 0.6154 0.6137 0.6101 0.6079
 0.6028 0.5977 0.5494 0.5477 0.5410 0.5368 0.5360 0.5351 0.5351 0.5236

Cápsula 13 Tipo 2 Q-A 12.6180 Q-B 11.7133 Q-AB 24.3313 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163
1.0733 1.0733 1.0733 1.0679 1.0652 1.0519 1.0439 1.0412 1.0412 1.0333 1.0281 1.0254 0.6289 0.6285 0.6279 0.6261 0.6261 0.6251 0.6244 0.6244 0.6218 0.6216 0.6199 0.6079 0.6062 0.6045 0.6045 0.6045 0.4566 0.4535 0.4520 0.4489
Cápsula 14 Tipo 2 Q-A 13.5842 Q-B 9.8348 Q-AB 23.4190 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163
1.2575 1.2543 1.2381 1.1278 1.1278 1.1196 1.1168 1.0760 1.0706 1.0679 1.0679 1.0599 0.6307 0.5947 0.5947 0.5923 0.5923 0.5375 0.5207 0.5207 0.5186 0.5159 0.5123 0.4785 0.4292 0.4069 0.4038 0.4022 0.3975 0.3975 0.3975 0.3913
Cápsula 15 Tipo 2 Q-A 14.0575 Q-B 9.8885 Q-AB 23.9460 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163
1.2543 1.2543 1.2510 1.2502 1.2380 1.2336 1.1614 1.1614 1.0706 1.0652 1.0603 1.0572 0.5477 0.5426 0.5426 0.5375 0.5273 0.5240 0.5234 0.5223 0.5223 0.5156 0.5133 0.4836 0.4651 0.4651 0.4651 0.4635 0.4603 0.4372 0.4325 0.3975
Cápsula 16 Tipo 2 Q-A 14.1221 Q-B 9.9201 Q-AB 24.0422 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163
1.2428 1.2367 1.2367 1.2367 1.2306 1.2306 1.1585 1.1555 1.1526 1.1496 1.1485 0.9433 0.5477 0.5460 0.5409 0.5240 0.5223 0.5206 0.5206 0.5190 0.5173 0.5140 0.5140 0.5140 0.4667 0.4619 0.4603 0.4587 0.4555 0.4539 0.4492 0.4135
Cápsula 17 Tipo 2 Q-A 12.0803 Q-B 10.0341 Q-AB 22.1144 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163
1.1233 1.1204 1.1175 1.1146 0.9762 0.9584 0.9534 0.9508 0.9458 0.9408 0.9408 0.9383 0.6114 0.5576 0.5558 0.5507 0.5455 0.5167 0.5167 0.5015 0.4934 0.4902 0.4885 0.4820 0.4820 0.4787 0.4771 0.4755 0.4656 0.4594 0.4546 0.4312
Cápsula 18 Tipo 2 Q-A 12.1664 Q-B 9.6970 Q-AB 21.8634 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163
1.0859 1.0830 1.0802 1.0716 1.0631 0.9813 0.9788 0.9762 0.9660 0.9635 0.9609 0.9559 0.6120 0.5477 0.5257 0.5210 0.5190 0.5012 0.5012 0.4744 0.4731 0.4700 0.4683 0.4656 0.4656 0.4651 0.4635 0.4554 0.4554 0.4476 0.4354 0.4298
Cápsula 19 Tipo 2 Q-A 12.2284 Q-B 9.4969 Q-AB 21.7253 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163
1.0660 1.0631 1.0575 1.0547 1.0547 1.0547 0.9839 0.9813 0.9813 0.9788 0.9762 0.9762 0.5256 0.5179 0.5179 0.5148 0.5148 0.5133 0.5027 0.5012 0.4729 0.4714 0.4656 0.4641 0.4583 0.4439 0.4397 0.4368 0.4368 0.4354 0.4326 0.4312
Cápsula 20 Tipo 2 Q-A 12.2158 Q-B 10.1992 Q-AB 22.4150 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163
1.0830 1.0631 1.0603 1.0575 1.0547 1.0491 0.9890 0.9788 0.9775 0.9721 0.9667 0.9640 0.5957 0.5925 0.5318 0.5302 0.5287 0.5256 0.5240 0.5042 0.5033 0.5019 0.5019 0.5012 0.4997 0.4997 0.4945 0.4931 0.4901 0.4887 0.4598 0.4326
Cápsula 21 Tipo 2 Q-A 13.2246 Q-B 10.7288 Q-AB 23.9534 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163
1.2543 1.2510 1.0859 1.0773 1.0745 1.0745 1.0716 1.0716 1.0688 1.0688 1.0660 1.0603 0.6053 0.6021 0.6005 0.5989 0.5989 0.5973 0.5470 0.5424 0.5348 0.5122 0.5078 0.5063 0.5048 0.5033 0.4989 0.4975 0.4960 0.4960 0.4901 0.4887
Cápsula 22 Tipo 2 Q-A 13.9198 Q-B 10.2035 Q-AB 24.1233 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163
1.2608 1.2608 1.2575 1.2543 1.2510 1.0973 1.0973 1.0944 1.0916 1.0916 1.0887 1.0745 0.5713 0.5713 0.5409 0.5409 0.5394 0.5394 0.5363 0.5237 0.5152 0.5152 0.5122 0.5078 0.5078 0.5048 0.4706 0.4628 0.4628 0.4613 0.4599 0.4599
Cápsula 23 Tipo 2 Q-A 13.5046 Q-B 9.6953 Q-AB 23.1999 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163
1.2608 1.1556 1.1185 1.1185 1.1154 1.1124 1.1124 1.1093 1.1093 1.1093 1.0944 1.0887 0.5713 0.5681 0.5382 0.5382 0.5305 0.4794 0.4735 0.4720 0.4706 0.4691 0.4662 0.4633 0.4619 0.4619 0.4590 0.4576 0.4576 0.4547 0.4532 0.4490
Cápsula 24 Tipo 2 Q-A 14.3787 Q-B 10.0612 Q-AB 24.4399 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163
1.2575 1.2510 1.2349 1.2317 1.2284 1.2252 1.2220 1.2124 1.1587 1.1556 1.1494 1.0519 0.5618 0.5602 0.5554 0.5539 0.5351 0.5336 0.5336 0.5336 0.5321 0.5290 0.5290 0.4677 0.4648 0.4604 0.4561 0.4561 0.4518 0.4490 0.4490 0.4490
Cápsula 25 Tipo 2 Q-A 12.9583 Q-B 7.2928 Q-AB 20.2511 Q-M 22.7683 SD-Q 3.001163
1.2575 1.2543 1.2381 1.2349 1.2349 1.2156 1.2092 1.0639 1.0639 1.0609 0.5649 0.5602 0.5554 0.5539 0.5398 0.5336 0.4764 0.4750 0.4720 0.4706 0.4677 0.4677 0.4677 0.4604 0.4547 0.4518 0.4461 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

